Sinusgeneratoren

De sinusspanning is de belangrijkste signaalvorm uit de elektronica. De theorie van Fourier leert immers dat alle signalen zijn samengesteld uit een menging van sinusvormige spanningen. Het zal dus duidelijk zijn dat schakelingen die sinussen kunnen genereren zeer nuttig zijn. In dit artikel leert u hoe u analoge sinusgeneratoren kunt ontwerpen.

Auteur: Jos Verstraten, Landgraaf, Nederland
Email: josverstraten@live.nl
Publicatiedatum: 15-08-2018

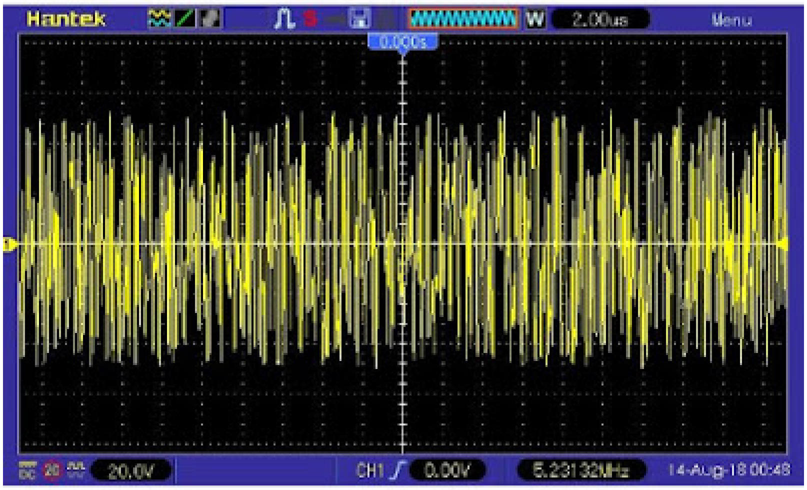
Achtergrondinformatie

Operationele versterkers

In de praktijk blijkt dat operationele versterkers de enige moderne analoge schakelingen zijn waarmee u zonder al te veel problemen sinusgeneratoren kunt samenstellen. In dit artikel zullen we dus uitsluitend sinusgeneratoren rond deze onderdelen bespreken.

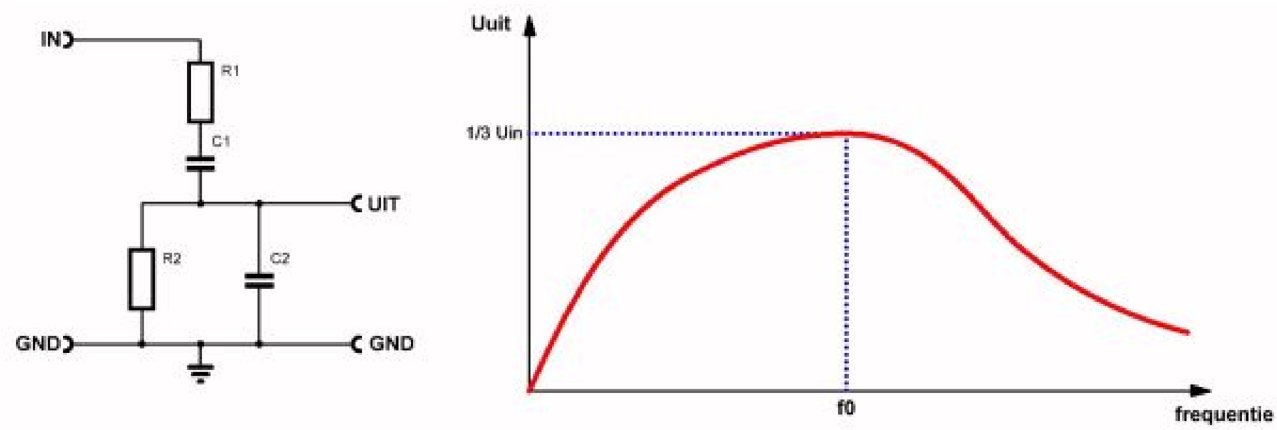
Ruis

Wilt u de werking van een sinusgenerator doorgronden, dan is het noodzakelijk dat u eerst wat algemene theoretische begrippen van de elektronica kunt plaatsen. Het eerste begrip dat aan de orde komt is *'ruis'*. Ruis kunt u beschrijven als een ongewenste stoorspanning, die in iedere elektronische schakeling ontstaat. Er bestaan verschillende soorten ruis, maar de meest voorkomende is de *'thermische ruis'*. Onder invloed van de temperatuur van de onderdelen waaruit een elektronische schakeling is opgebouwd gaan vrije elektronen van het ene naar het andere atoom springen. Deze elektronenbeweging veroorzaakt een zeer klein stroompje en dit stroompje wekt een ruisspanning op over de onderdelen waardoor het stroomt.
Ruis is dus een volledig statistisch verschijnsel. U kunt de momentane waarde van een ruisspanning niet voorspellen of berekenen. Het gevolg is dat ruis is samengesteld uit signaaltjes met zeer uiteenlopende frequenties. Als u een ruissignaal analyseert naar frequentie-inhoud, dan stelt u vast dat zowat alle mogelijke frequenties binnen een bepaalde band in gelijke mate aanwezig zijn.



Het typisch uiterlijk van een ruissignaal. (© 2018 Jos Verstraten)

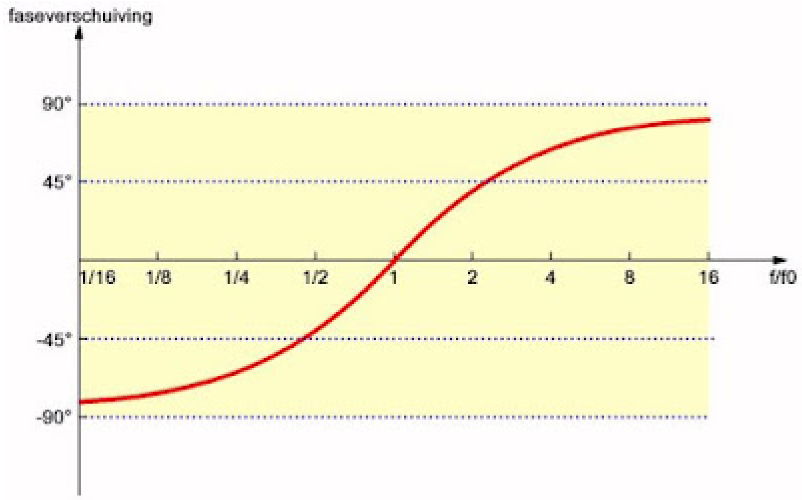
Afgestemd filter en de brug van Wien
Een tweede fundamenteel principe dat u moet kennen is dat van het afgestemd filter. Een afgestemd filter is een schakeling die signalen met één bepaalde frequentie maximaal doorlaat of verzwakt en signalen met afwijkende frequenties verzwakt of net wél doorlaat. Er bestaan ontelbare schakelingen van afgestemde filters. Sinusgeneratoren zijn vrijwel steeds opgebouwd rond een afgestemd filter dat door het leven gaat onder de naam *'brug van Wien'*. De typische samenstelling van een dergelijk afgestemd filter is weergegeven in onderstaande figuur. De ingang wordt via een weerstand R1 en een condensator C1 verbonden met de uitgang. Tussen de uitgang en de massa staat de parallelschakeling van een weerstand R2 en een condensator C2. In alle gevallen is R1 = R2 en C1 = C2.
Als u aan de ingang van het filter een sinussignaal met een variabele frequentie legt en u meet hoeveel van dit signaal op de uitgang terug te vinden is, dan ontstaat het typisch plaatje dat rechts in de figuur is geschetst. Voor zeer lage frequenties zult u niets op de uitgang terug vinden. Dat is vrij logisch, want de seriecondensator C1 heeft voor deze lage frequenties een zeer hoge impedantie.
Als de frequentie van het ingangssignaal stijgt zult u steeds meer uitgangssignaal meten. Er is een bepaalde frequentie f_0, waarbij het uitgangssignaal maximaal is. Laat u de frequentie van het ingangssignaal verder toenemen, dan blijkt dat er op de uitgang weer minder signaal terug te vinden is. Ook dat is logisch, want naarmate de frequentie van het signaal stijgt zal de condensator C2 een steeds kleinere impedantie krijgen en steeds meer van het signaal kortsluiten naar de massa.



De brug van Wien met de frequentieweergave. (© 2018 Jos Verstraten)

Resonatiefrequentie
De frequentie f_0 noemt men de eigen frequentie of resonantiefrequentie van het filter. Bij deze frequentie zal de brug van Wien precies drie maal verzwakken. De uitgangsspanning is dus gelijk aan ⅓ van de ingangsspanning.

Faseverschuiving
Maar er is nog een tweede belangrijke eigenschap van de brug van Wien die niet onvermeld mag blijven. Meet u namelijk de faseverschuiving tussen de in- en de uitgangsspanning, dan zult u vaststellen dat bij de eigen frequentie f_0 deze faseverschuiving precies 0° bedraagt. Dit verschijnsel wordt grafisch voorgesteld in onderstaande figuur. Voor alle andere signaalfrequenties bestaat er een positief of negatief faseverschil tussen het in- en uitgangssignaal. Dat faseverschil kunt u opvatten als een tijdsverschil tussen het in- en het uitgangssignaal.

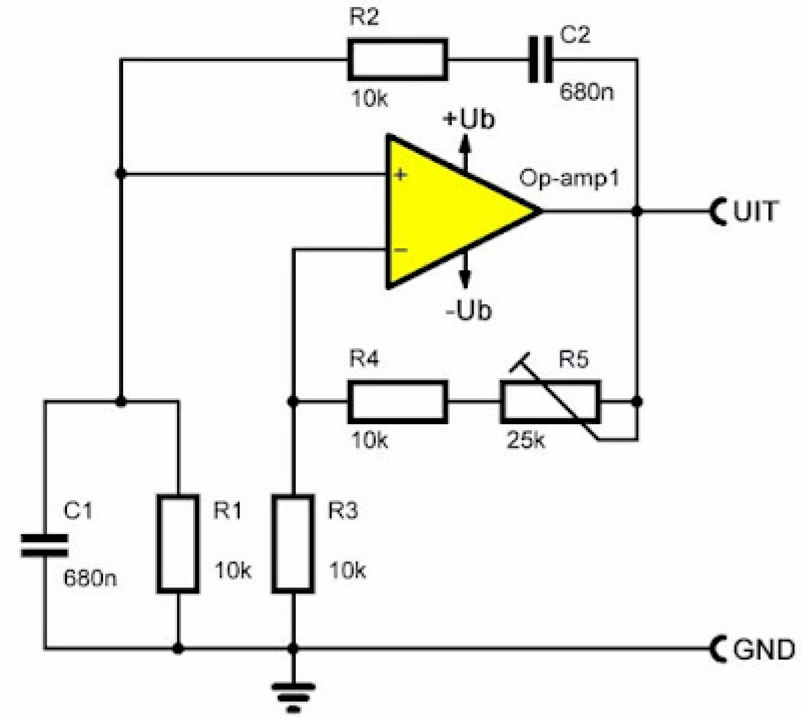


De faseverschuiving die door de brug van Wien wordt geïntroduceerd.
(© 2018 Jos Verstraten)

Ruis en de brug van Wien
Sluit u op de ingang van het filter een ruissignaal aan, dan zal de signaalcomponent in de ruis met een frequentie gelijk aan de f_0 van de brug van Wien minder verzwakt op de uitgang verschijnen dan alle andere ruiscomponenten. Bovendien zal dat het enige signaal uit de ruis zijn, waarbij geen faseverschuiving optreedt!

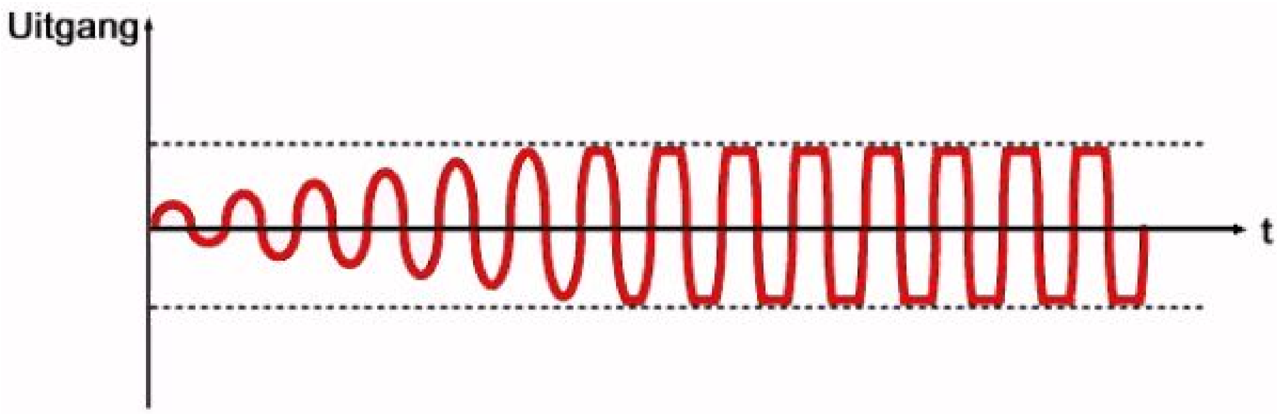
De fundamentele sinusgenerator

Het basisschema
Het fundamentele schema van een sinusgenerator met een operationele versterker is getekend in onderstaande figuur. Opgemerkt moet worden dat deze schakeling nog niet werkt! Maar de bespreking van dit systeem is een noodzakelijke stap naar de uiteindelijke sinusschakeling.
De niet-inverterende ingang van de operationele versterker is opgenomen in een brug van Wien. Deze is geschakeld tussen de uitgang en de massa. De uitgang van de op-amp is dus de ingang van de brug van Wien, de niet-inverterende ingang de uitgang.
De inverterende ingang van de op-amp is opgenomen in een resistieve terugkoppeling. De weerstanden R3, R4 en R5 zorgen er voor dat de schakeling een bepaalde versterkingsfactor heeft. De waarde van de versterkingsfactor is instelbaar door het verdraaien van de instelpotentiometer R5. Stel dat u de weerstand op minimale waarde instelt. Op dat moment wordt de versterking van de op-amp bepaald door de verhouding tussen de weerstanden R3 en R4. Stel nu dat u de schakeling met symmetrische spanningen voedt en dat u een oscilloscoop op de uitgang aansluit. Er zal niets gebeuren, de uitgang van de schakeling blijft op 0 V staan. Vervolgens verdraait u zeer langzaam de loper van R5, zodat de versterking van de schakeling langzaam stijgt. Op een bepaald moment zult u merken dat op de uitgang van de schakeling zeer kleine sinusoidale oscillaties ontstaan. Op dat moment mag u de loper van de potentiometer R5 niet meer verdraaien.



De eerste stap op weg naar de sinusgenerator. (© 2018 Jos Verstraten)

Het oscilleren start!
Wat er vervolgens gebeurt is geschetst in onderstaande figuur. De amplitude van de uitgangsspanning zal langzaam stijgen en in eerste instantie zal het signaal sinusvormig verlopen. Na een bepaalde tijd wordt echter de amplitude zo groot dat het uitgangssignaal van de op-amp vastloopt tegen de voedingsspanningen. De sinus gaat eerst vervormen en na enige tijd is deze vervorming zo groot geworden dat het uitgangssignaal lijkt op een rechthoekvormige spanning. Dat is de stabiele situatie van de schakeling.



Het verloop van de uitgangsspanning van de schakeling. (© 2018 Jos Verstraten)

Verklaring van de werking
Het is van het grootste belang dat u het eigenaardige gedrag van de schakeling begrijpt. Wat gebeurt er? Bij het aanschakelen van de voeding zal er in alle weerstanden een ruisspanning worden geïntroduceerd. Deze ruisspanningen verschijnen uiteraard ook op de uitgang van de operationele versterker. Deze worden teruggekoppeld naar de niet-inverterende ingang via de brug van Wien. Dit filter zal ervoor zorgen dat de ruissignalen met frequentie gelijk aan f_0 het minst verzwakt worden teruggekoppeld naar de niet-inverterende ingang. Bovendien verschijnen alleen deze signalen in fase op de uitgang van het filter. Maar het Wien-netwerk verzwakt ook deze signalen drie maal. Omdat de versterking van de op-amp op dit moment kleiner is dan drie zal het signaal met frequentie f_0 weliswaar versterkt aan de uitgang verschijnen, maar te weinig versterkt om de verzwakking van het Wíen-filter te elimineren. De schakeling blijft in rust.
Als u echter, door het verdraaien van de loper van R5, de versterking van de schakeling opvoert tot exact drie, dan zal het teruggekoppelde en met een factor drie verzwakte signaal

met een frequentie f_0 nadien drie maal door de op-amp versterkt worden. Dit signaal wordt weer teruggekoppeld, verschijnt drie maal verzwakt maar in fase op de niet-inverterende ingang en wordt nadien weer eens drie maal versterkt door de op-amp. Het gevolg is dat alleen dit ene signaal in de schakeling kan blijven circuleren en dat de schakeling in principe een mooie, onvervormde sinus met een frequentie gelijk aan f_0 op de uitgang zal aanbieden.

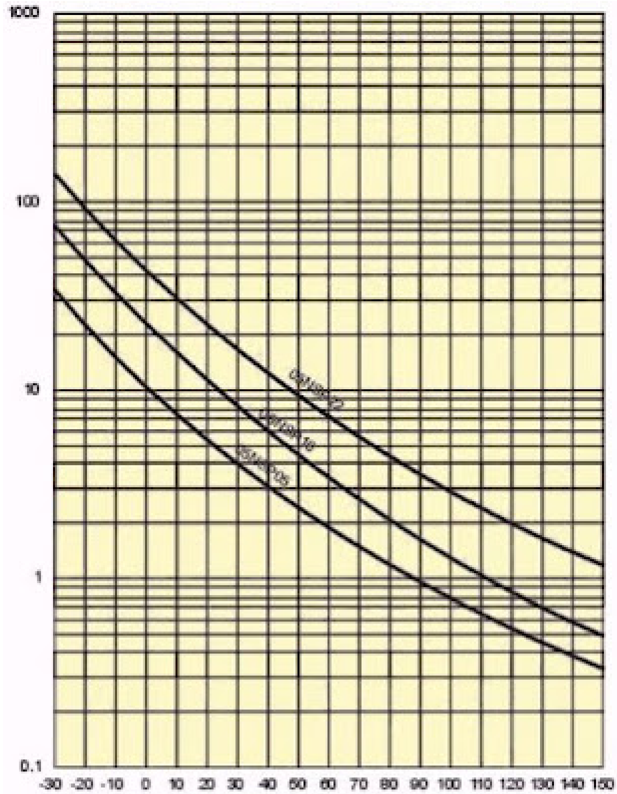
Versterking = verzwakking
Maar de gehele werking van de schakeling hangt af van het exact compenseren van de verzwakking van de brug van Wien door de op-amp! Als de versterking van de op-amp iets kleiner wordt dan drie, dan zal het signaal weer uitsterven. Als echter de versterking van de op-amp iets groter is dan drie, dan zal het signaal meer door de op-amp worden versterkt dan verzwakt door het Wien-filter en zal de schakeling na enige tijd vastlopen tegen de voedingsspanningen.

Besluit
De schakeling zal dus alleen werken als stabiele sinusgenerator als de operationele versterker de verzwakking van het Wien-filter precies compenseert. Het zal duidelijk zijn dat aan deze eis nooit ofte nimmer voldaan kan worden door de versterking van de op-amp in te stellen met een potentiometertje. De minste of geringste weerstandsvariatie, bijvoorbeeld onder invloed van de temperatuur, zal tot gevolg hebben dat de versterking van de op-amp iets groter of kleiner wordt dan drie, met als gevolg dat de oscillatie ofwel vastloopt ofwel uitsterft.
De enige mogelijkheid om de basisschakeling om te vormen tot een praktisch bruikbare sinusgenerator is het introduceren van een automatische versterkingsregeling, die ervoor zorgt dat de versterking zich automatisch aanpast aan de verzwakking van het filter. Of met andere woorden, u moet een schakeling introduceren die de versterking van de operationele versterker automatisch zo instelt, dat de amplitude van de uitgangsspanning constant blijft.

AVR, automatische versterkingsregeling

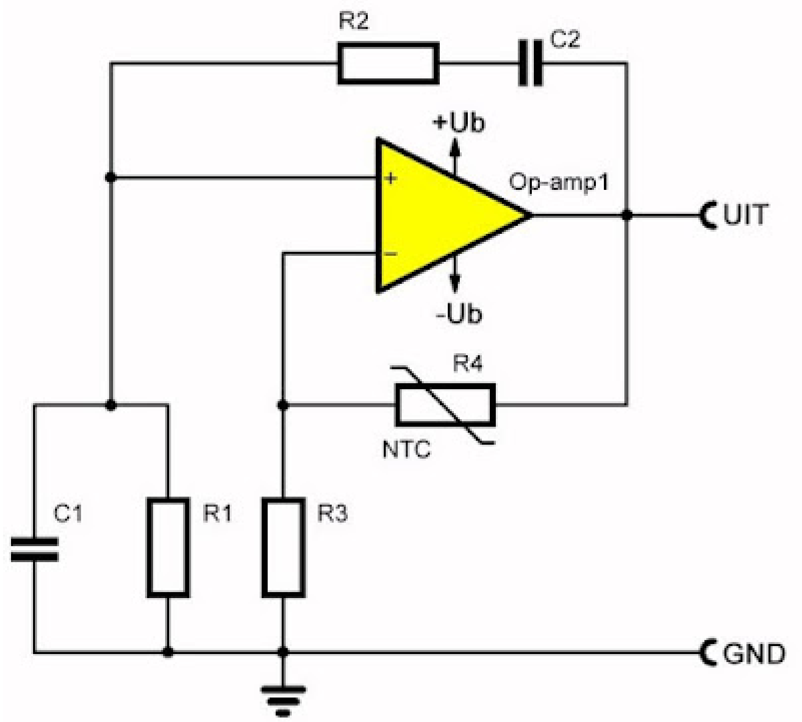
De AVR bepaalt de kwaliteit van een sinusgenerator
Voor deze absoluut noodzakelijke automatische versterkingsregeling zijn in de loop der jaren ontelbare systemen en principes ontwikkeld. Sommigen zijn zeer eenvoudig, anderen bevatten veel meer componenten dan de eigenlijke sinusgenerator zélf. Dat is niet ten onrechte, want de kwaliteit van een sinusgenerator wordt volledig bepaald door de eigenschappen van de automatische versterkingsregeling. Het probleem is dat deze schakeling een niet-lineaire terugkoppeling in de schakeling introduceert. De specificaties van deze terugkoppeling bepalen onder andere de vervorming die op de sinus op de uitgang ontstaat. Er bestaan sinusgeneratoren met een vervorming van 1 % en met een vervorming van 0,01 %. Deze waarde wordt in eerste instantie bepaald door de nauwkeurigheid van de onderdelen in de brug van Wien, maar in tweede bijna even belangrijke instantie door de kwaliteit van de automatische versterkingsregeling.
In de volgende paragraafjes worden enige vaak toegepaste systemen onder het vergrootglas gelegd.

Een thermistor als terugkoppel-element
Een thermistor, NTC of weerstand met negatieve temperatuurscoëfficiënt is een weerstand waarvan de weerstand daalt naarmate de weerstand warmer wordt. De karakteristieken van enige thermistors zijn getekend in onderstaande figuur. U ziet op de horizontale as de temperatuur en op de verticale as de weerstand van de NTC.



De weerstand van NTC's in functie van de temperatuur.
(© welcu.com)

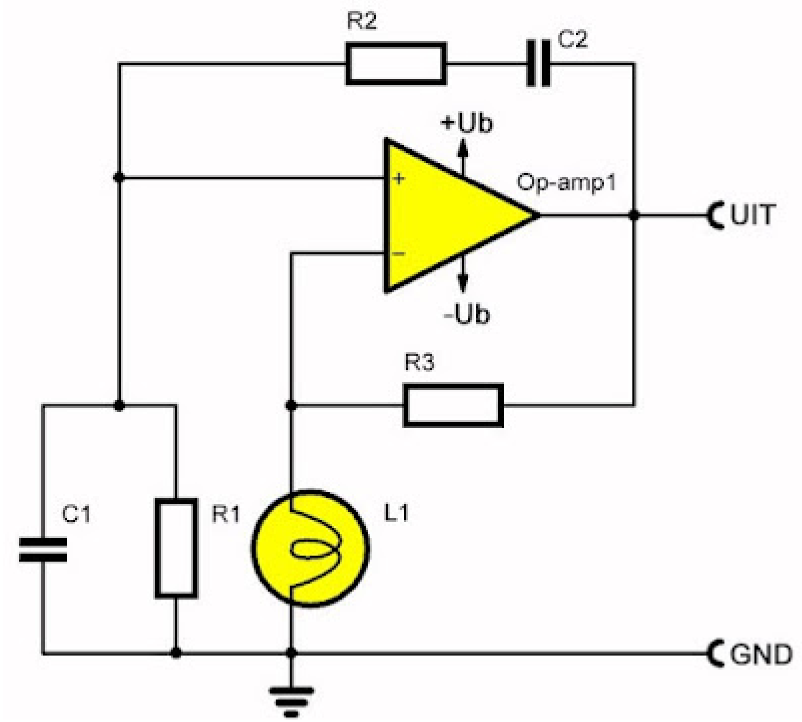
Een dergelijke thermistor kunt u volgens het schema van onderstaande figuur gebruiken om de versterking van een sinusgenerator automatisch te stabiliseren. De thermistor is opgenomen in het versterkingsbepalende terugkoppelnetwerk van de uitgang naar de inverterende ingang. Als u de schakeling met de voeding verbindt zal de thermistor koud zijn en zal zijn weerstand vrij hoog zijn. De versterkingsfactor van de op-amp wordt bepaald door de verhouding tussen de weerstand van de thermistor en de waarde van de weerstand R3. Deze verhouding is groot en de schakeling zal in ieder geval meer dan drie maal versterken. Het gevolg is dat aan de oscillatievoorwaarde wordt voldaan. De op-amp compenseert de verzwakking van het Wien-netwerk en de schakeling gaat oscilleren. De uitgangsspanning is in eerste instantie vrij groot, de kans is zelfs aanwezig dat de uitgangsspanning volledig vastloopt tegen de voedingsspanningen. Deze grote uitgangsspanning stuurt een stroom door de thermistor waardoor deze iets gaat opwarmen en zijn weerstand afneemt. Het gevolg is dat de versterkíngsfactor van de op-amp ook gaat dalen. De kunst is nu een geschikte thermistor te vinden en deze te combineren met een juiste waarde voor de weerstand R3. Alleen dan zal de schakeling zich stabiliseren in een toestand waarin een stabiele en tamelijk vervormingsvríje sinus op de uitgang ontstaat.
Het nadeel van deze schakeling is dat de omgevingstemperatuur een grote invloed heeft op de werking van de schakeling. Vandaar dat u een thermistor-gestabiliseerde sinusgenerator alleen zult aantreffen op plaatsen waar er geen al te hoge eisen worden gesteld aan de kwaliteit van de sinus.



Een thermistor wordt gebruikt voor het instellen van de versterking van de sinusgenerator. (© 2018 Jos Verstraten)

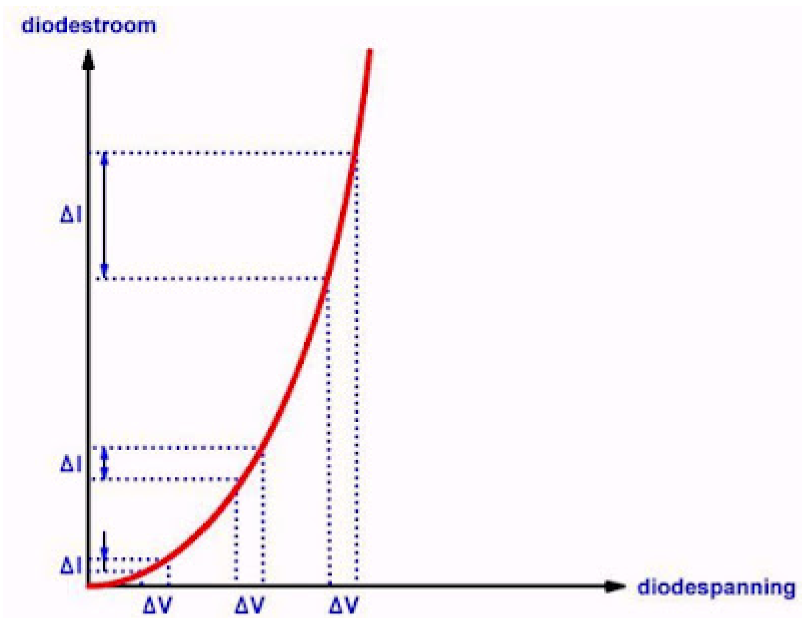
Een gloeilampje als terugkoppel-element

Een gloeilamp is in feite een PTC of weerstand met positieve temperatuurscoëfficiënt. In koude toestand heeft de gloeidraad van een lampje een kleine weerstand en deze weerstand stijgt naarmate de gloeidraad opwarmt. Dank zij deze eigenschap is het mogelijk een sinusgenerator te stabiliseren door een klein gloeilampje in de terugkoppeling op te nemen. Het basisschema is getekend in onderstaande figuur. Het lampje L1 is geschakeld tussen de inverterende ingang van de op-amp en de massa. In koude toestand is de weerstand van L1 laag. De versterking van de op-amp wordt bepaald door de verhouding tussen de weerstand van dit lampje en de waarde van de weerstand R3. Deze verhouding is groot, de op-amp versterkt veel meer dan drie en de schakeling gaat oscilleren. De grote uitgangsspanning stuurt een stroom door R3 en L1 met als gevolg dat de gloeidraad opwarmt en de weerstand stijgt. De versterkingsfactor neemt af en ook nu is het weer de kunst L1 en R3 zo te selecteren dat de schakeling zich stabiliseert op een versterkingsfactor van drie.
Deze schakeling heeft dezelfde nadelen als deze met een thermistor.



Een gloeilampje als AVR in een sinusgenerator. (© 2018 Jos Verstraten)

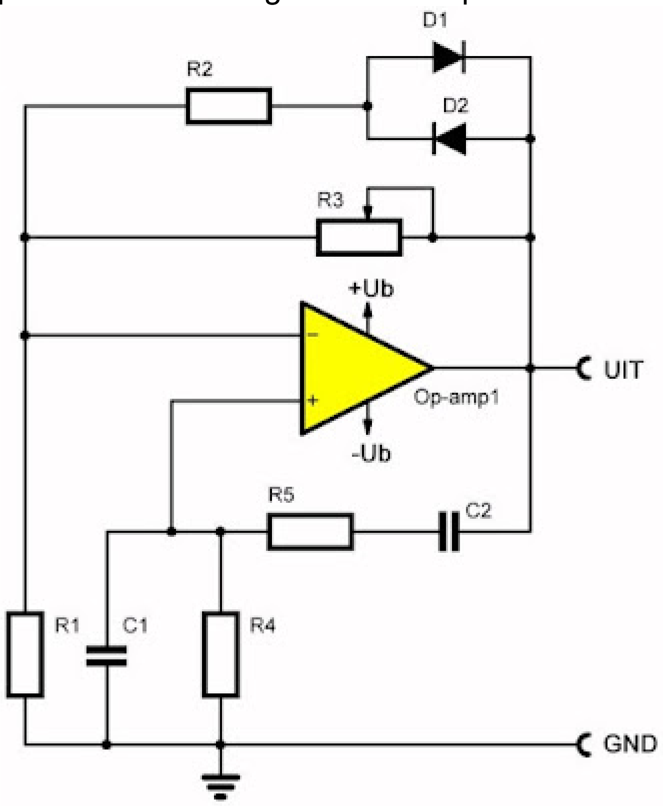
Een siliciumdiode als terugkoppel-element
Een siliciumdiode heeft een stroom/spanning-karakteristiek die getekend is in onderstaande figuur. Als de spanning over de diode laag is, dan is ook de stroom zeer klein. Naarmate de spanning stijgt zal de stroom echter meer dan lineair stijgen. Uit de stroom/spanning-karakteristiek van een onderdeel kunt u de waarde van de inwendige weerstand afleiden. Dat is in de grafiek op drie verschillende plaatsen gedaan. Voor drie even grote spanningsvariaties ΔU wordt de overeenkomende stroomvariatie ΔI uitgezet. Hieruit blijkt dat ΔI_1 veel kleiner is dan ΔI_3. Het logische gevolg is dat de inwendige weerstand van de diode bij de laagste ΔU veel groter is dan bij de hoogste ΔU. De stroomvariatie bij gelijk blijvende spanningsvariatie wordt immers volledig bepaald door de weerstand!
U kunt dus besluiten dat de inwendige weerstand van een siliciumdiode niet constant is, maar afneemt naarmate er meer spanning over de diode staat. Het zal dus duidelijk zijn dat u een dergelijk onderdeel kunt gebruiken voor het stabiliseren van de versterking van een sinusgenerator.



De stroom/spanning-karakteristiek van een Si-diode. (© 2018 Jos Verstraten)

Het basisschema
Het basisschema is getekend in onderstaande figuur. Twee anti-parallel geschakelde dioden

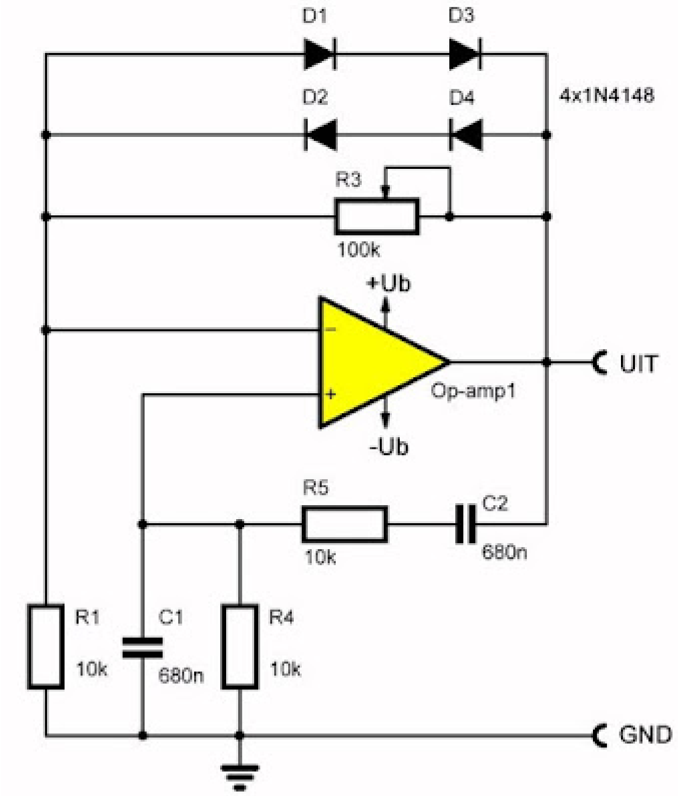
D1 en D2 zijn opgenomen in de terugkoppellus van de operationele versterker. Het principe is steeds hetzelfde. Bij het inschakelen van de voeding staat er geen spanning over de dioden. Deze hebben dus een zeer hoge weerstand. De versterkingsfactor van de operationele versterker is zeer groot, de schakeling gaat onmiddellijk oscilleren. Naarmate de uitgangsspanning stijgt komt er meer spanning over de dioden te staan. Hun inwendige weerstand daalt en dus ook de versterking van de op-amp. Ook nu is het uw ontwerperskunst die er voor moet zorgen R1, R2, R3, D1 en D2 zo te dimensioneren dat de schakeling zich uiteindelijk stabiliseert op een versterkingsfactor van drie. In de meeste gevallen moet u de schakeling een handje helpen door een instelpotentiometer in de terugkoppeling op te nemen. Met deze potentiometer R3 kunt u de schakeling afregelen op een mooie sinus op de uitgang. Dat er twee dioden noodzakelijk zijn is logisch. Dioden geleiden immers alleen als de anode positief is ten opzichte van de kathode. U hebt dus een diode nodig voor het stabiliseren van de schakeling voor de positieve helften van het uitgangssignaal en een tweede voor dezelfde opdracht voor de negatieve halve perioden.



Een sinusgenerator met twee Si-dioden als VCA. (© 2018 Jos Verstraten)

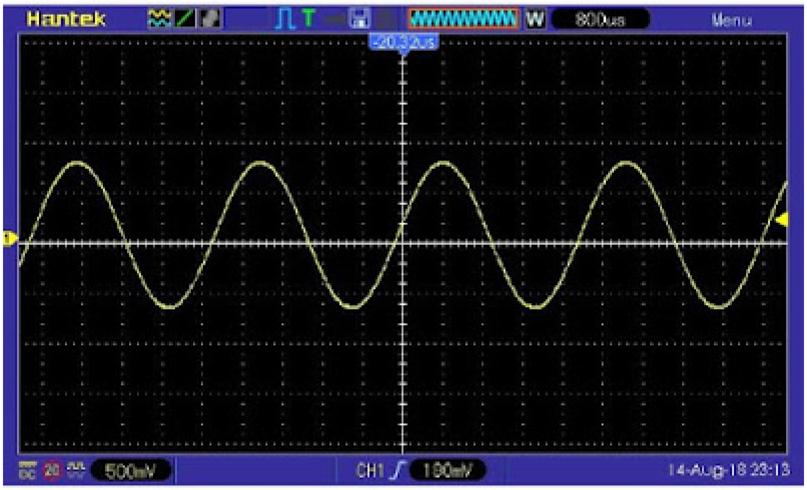
Vier dioden beter dan twee dioden

Hoewel het in principe mogelijk is gebruik te maken van slechts twee dioden zult u in de meeste praktische schakelingen vier dioden aantreffen. Met slechts twee dioden kunt u de uitgangsspanning stabiliseren op een tamelijk kleine waarde van ongeveer 1,5 $V_{top\text{-}tot\text{-}top}$. U kunt echter de op-amp gerust verder uitsturen zonder dat het gevaar bestaat dat er vervorming ontstaat als gevolg van het vastlopen van de uitgangsspanning. Gebruikt u vier dioden, zoals getekend in onderstaande figuur, dan kan kunt u de schakeling stabiliseren op een top-tot-top waarde van ongeveer 3 V.
Stelt u echter prijs op een minimale vervorming op de sinus, dan is het noodzakelijk dat de vier dioden identieke karakteristieken hebben.



Een sinusgenarator met vier Si-dioden als VCA. (© 2018 Jos Verstraten)

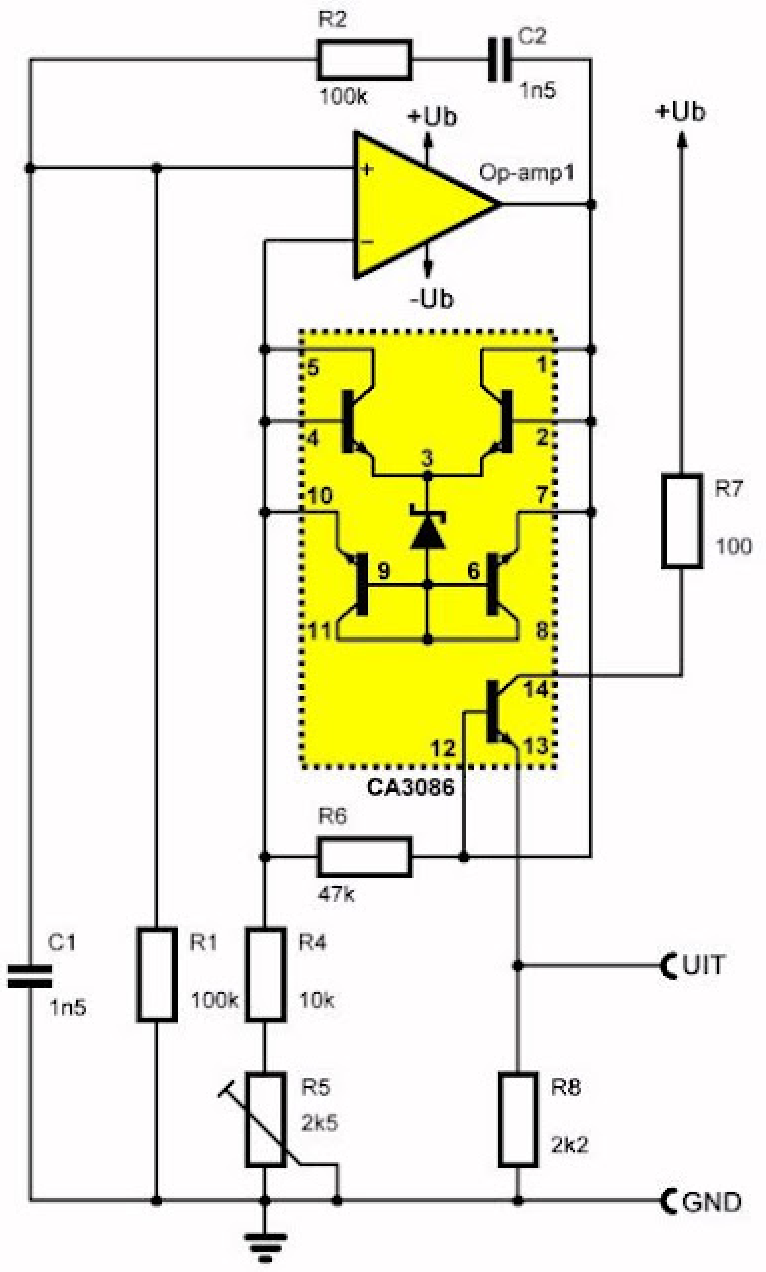
Dat u met deze eenvoudige schakeling aardige resultaten kunt bereiken bewijst onderstaand oscillogram dat de uitgangsspanning van deze sinusgenerator toont, uiteraard afgeregeld op minimale vervorming op de sinus.



Het uitgangssignaal van de schakeling van de vorige afbeelding. (© 2018 Jos Verstraten)

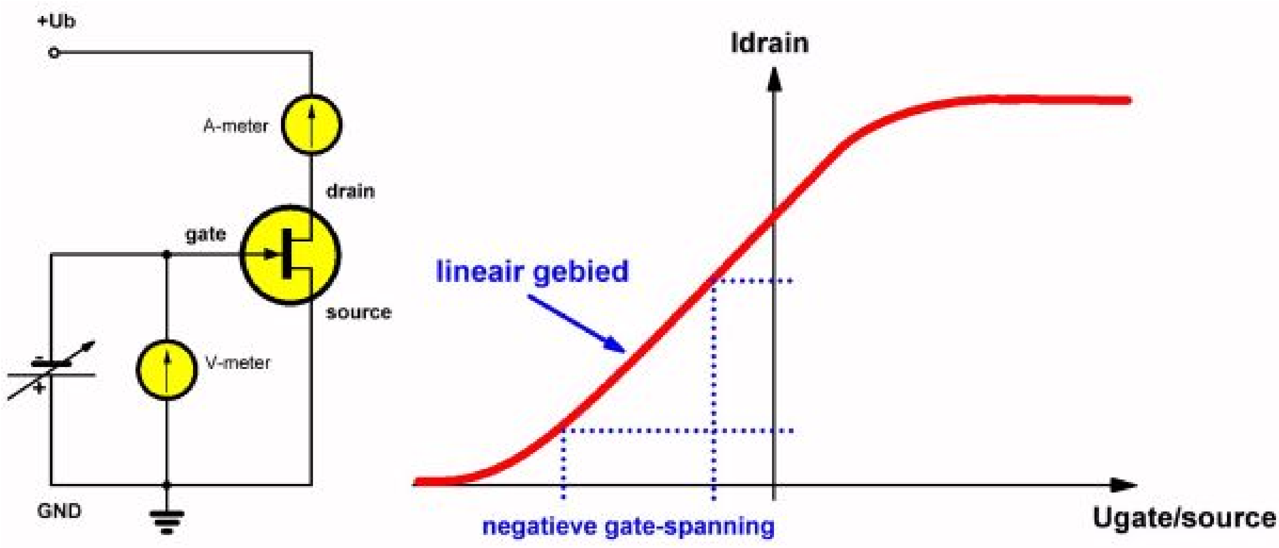
Een diode-array als terugkoppel-element

Het zal maar zelden het geval zijn dat u vier identieke losse dioden in de schakeling soldeert. Veel beter kunt u gebruik maken van een array, waarin een aantal dioden zijn opgenomen die volledig identieke eigenschappen hebben. Als voorbeeld van deze techniek wordt in onderstaande figuur een schema van een praktisch bruikbare sinusgenerator gegeven. In dit schema is de terugkoppeling opgebouwd rond een CA3086. Deze chip bevat een aantal volledig identieke transistoren die hier, door het doorverbinden van basis en collector, als diode worden ingezet. De onderste transistor 12/13/14 wordt gebruikt als emittervolger en levert de sinus met een zeer lage uitgangsimpedantie af aan de uitgang. De frequentie van de sinus is ingesteld op 1 kHz en afgeregeld op een totale harmonische vervorming van slechts 0,04 %.



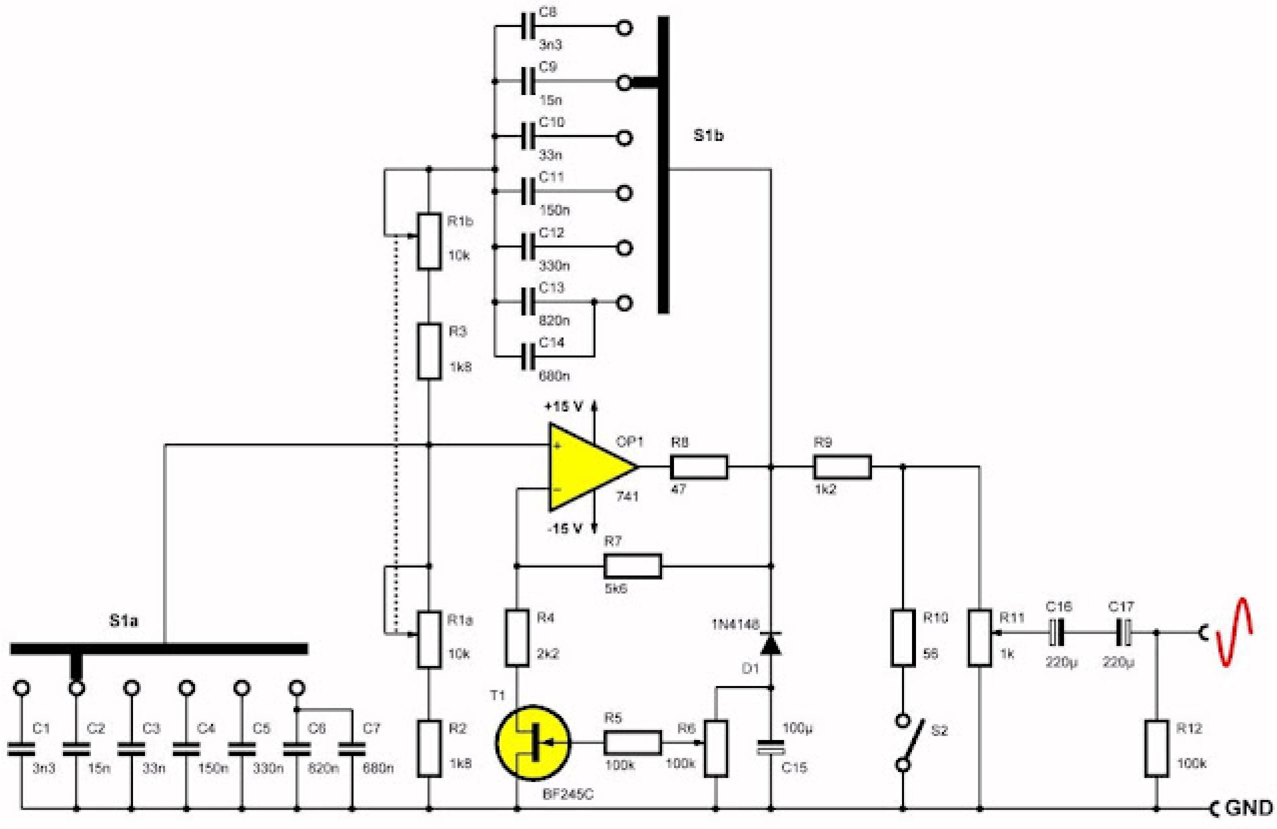
Het gebruik van een diode-array minimaliseert de vervorming op de sinus.
(© 2018 Jos Verstraten)

Een FET als terugkoppel-element
Als laatste voorbeeld van een bruikbaar terugkoppelelement wordt de FET behandeld. Een FET is een transistor die een zeer lineair gedeelte is zijn stroom/spanning-karakteristiek vertoont, zie onderstaande figuur. Als de gate negatief wordt gemaakt ten opzichte van de source ontstaat er een gebied waar er een volstrekt lineair verband bestaat tussen de gate/source-spanning en de drain-stroom. In dit gebied gedraagt de FET zich als een bestuurbare weerstand, waarvan de weerstand tussen drain en source recht evenredig is met de spanning tussen de gate en de source.
Dankzij deze eigenschap kan de FET worden ingezet om de versterking van een sinusgenerator te stabiliseren. En dank zij dit volstrekt lineaire gedrag is dat zelfs de beste oplossing omdat er nu geen sprake hoeft te zijn van niet-lineaire terugkoppeling en de daarmee samenhangende harmonische vervorming op het uitgangssignaal. In de meeste praktische sinusgeneratoren zult u dan ook een FET als terugkoppel-element aantreffen.



De stroom/spanning-karakteristiek van een FET. (© 2018 Jos Verstraten)

Een praktische schakeling met FET-terugkoppeling
Een zeer eenvoudige voorbeeldschakeling van het FET-principe is getekend in onderstaande figuur. De FET T1 is opgenomen in de versterkingsfactor bepalende terugkoppeling van de op-amp OP1. Deze terugkoppeling bestaat daarnaast uit de onderdelen R4 en R7. Het probleem bij dergelijke schakelingen is het afleiden van het gate-signaal voor de FET. De gate moet immers met een gelijkspanning gestuurd worden, de oscillator levert een wisselspanning. In dit voorbeeld wordt dit probleem op de meest eenvoudige manier opgelost. De uitgangsspanning van de sinusgenerator wordt gelijkgericht met behulp van de diode D1. Het gelijkgerichte signaal wordt afgevlakt met de condensator C15. De afgevlakte spanning wordt aangeboden aan een instelpotentiometer R6. De loper gaat naar de gate van de FET. Met behulp van de potentiometer R6 kunt u het meest gunstigste instelpunt van de FET bepalen.
De werking van de schakeling wijkt in wezen niet af van de tot nu toe behandelde systemen. Als de schakeling met de voedingen wordt verbonden zal de spanning over de condensator C15 0 V
bedragen. Het gevolg is dat de drain-stroom van de FET vrij hoog is en zijn inwendige weerstand laag. De terugkoppeling bestaat dan uit deze lage weerstand in serie met de eveneens vrij lage R4 en de 5,6 kΩ van de weerstand R7. De schakeling heeft een versterkingsfactor die groter is dan drie en de generator kan oscilleren. De groeiende uitgangsspanning wordt gelijkgericht en bouwt over de condensator C15 een negatieve spanning op. Deze spanning verlegt het instelpunt van de FET in negatieve zin, waardoor de drainstroom daalt en de FET een hogere weerstand krijgt. De versterking van de schakeling gaat dalen. Als u teveel spanning via R5 toevoert aan de gate van de FET zal de versterking zover dalen dat de oscillatie uitsterft. Door echter R6 af te regelen kunt u de schakeling instellen op een stabiele sinusvormige uitgangsspanning.
Let bij dit voorbeeld ook even op de manier waarop u het frequentiebereik kunt instellen. Met de bereikenschakelaar S1a + S1b schakelt u twee identieke condensatoren in de terugkoppeling van de op-amp. Met de stereo-potentiometer R1a + R1b kunt u in ieder bereik de frequentie fijn instellen.
Ook de uitgangskring is een nadere studie waard, omdat u deze voor gelijk welke generator-schakeling kunt toepassen. De uitgang van de op-amp gaat naar een weerstandsdeler R9/R10/R11. Als de schakelaar S2 open staat speelt R10 niet mee en kunt u met de potentiometer R11 de uitgangsspanning instellen op de gewenste waarde. Moet u een heel kleine sinusspanning aftakken, dan sluit u de schakelaar S2 waardoor de zeer kleine weerstand R10 parallel over R11 komt te staan en het instelbereik van de uitgangsspanning met een factor tien daalt.



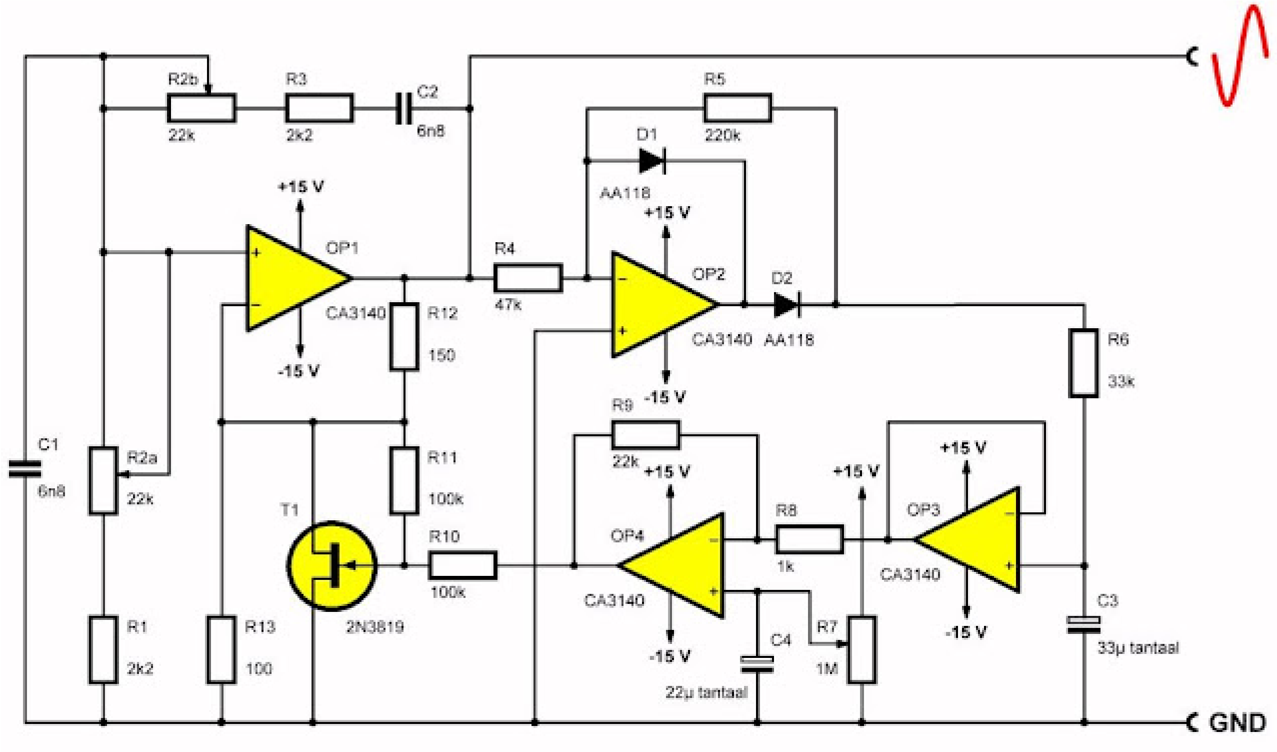
Een praktisch bruikbare sinusgenerator met een FET in de terugkoppeling. (© 2018 Jos Verstraten)

Nadeel van de schakeling
Het nadeel van deze eenvoudige schakeling is dat de lineaire werking van de FET grotendeels verloren gaat door de zeer eenvoudige opbouw van de gelijkrichter. Zoals bekend heeft een diode een alles behalve lineaire karakteristiek, zodat het omzetten van de uitgangsspanning van de sinusgenerator in een gelijkspanning voor het sturen van de FET niet-lineaire vervormingen in het systeem introduceert. Vandaar dat men in echt professionele schakelingen de gelijkrichter veel uitgebreider zal opbouwen.

Een professionele schakeling

Het beste tot het laatst bewaard...
In onderstaande figuur wordt tot slot het schema gegeven van een professionele sinusgenerator. Hier is alle mogelijke aandacht besteed aan het handhaven van de lineaire werking van de FET. De eigenlijke sinusgenerator is de schakeling rond operationele versterker OP1. U herkent de Wien-schakeling tussen de uitgang, de niet-inverterende ingang en de massa. Met de condensatoren van 6,8 nF kunt u de frequentie met de potentiometer R2 instellen tussen 960 Hz en 10 kHz. Vergroten en verkleinen van deze condensatoren met een factor tien verkleint en vergroot het frequentiebereik met dezelfde factor.
De uitgangsspanning van de generator wordt in eerste instantie aangeboden aan de ingang van een professionele topdetector rond de operationele versterker OP2. Het gebruik van ouderwetse germaniumdioden voor D1 en D2 is beslist noodzakelijk! De detector zal de sinusspanning omzetten in een gelijkspanning, waarvan de waarde precies gelijk is aan de topwaarde van de sinus. Deze gelijkrichting verloopt absoluut lineair. Nadien wordt de gelijkgerichte spanning die ontstaat over de tantaalcondensator C3 van 33 µF aan een buffer OP3 aangeboden. Deze zorgt ervoor dat de condensator niet ontladen kan worden door allerlei niet goed te definiëren parasitaire stromen die de lineaire werking van de topdetector zouden kunnen verstoren. De uitgangsspanning van de buffer gaat naar een comparator OP4, waar deze spanning wordt vergeleken met een instelbare drempel die u via de potentiometer R7 van 1 MΩ kunt instellen. De comparator vormt in feite een soort

optelversterker, die de gebufferde uitgangsspanning van de topdetector optelt bij een met de potentiometer instelbare instelspanning voor de FET. De uitgang van OP4 stuurt de gate van de FET.



Het schema van een professionele sinusgenerator. (© 2018 Jos Verstraten)